

## ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛА УКЛАДКИ ЗЕРЕН СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА МОДЕЛИ ЕМКОСТИ

В роботі представлені результати виконаних автором експериментальних спостережень на прозорій моделі вертикального перерізу ємності за характером укладки зерен сипучого матеріалу. Показано вплив кута нахилу бічної поверхні ємності та швидкості її завантаження на кут укладки зерен сипучого матеріалу. Проаналізовані процеси завантаження і вивантаження сипучого матеріалу. Встановлено ефект зміни напрямку сил тертя між зернами матеріалу в момент початку його вивантаження.

В работе представлены результаты выполненных автором экспериментальных наблюдений на прозрачной модели вертикального сечения емкости за характером укладки зерен сыпучего материала. Показано влияние угла наклона боковой стенки емкости и скорости ее загрузки на угол укладки зерен сыпучего материала. Проанализированы процессы загрузки и выгрузки сыпучего материала. Установлен эффект изменения направления сил трения между зернами материала в момент начала его выгрузки.

In the paper the results of the author's experimental observations with a transparent model of reservoir of vertical cross-section are presented. The observations were devoted to the character of packing the grains of loose material. The influence of a side-wall angle of the reservoir and rate of its filling on a packing angle of the loose material is shown. The processes of filling and emptying the model reservoir are analyzed. The effect of changing the direction of friction forces between the grains of the loose material in the beginning of emptying was discovered.

### 1. Сыпучие материалы и емкостные конструкции

Современные отрасли промышленности и сельского хозяйства заняты производством и переработкой огромного количества различного рода сыпучих веществ. Номенклатура используемых сыпучих материалов насчитывает сотни их видов, а примерно 50 из них являются теми сыпучими материалами, с которыми инженеры-технологи имеют дело ежедневно.

К их числу относятся и различные строительные материалы – песок, щебень, гравий, керамзит и пр., и материалы рудно-угольной сферы – агломераты, кокс, руды, штейны и пр., и химические вещества – порошки и концентраты, а также разнообразные пищевые продукты – зерно, крупы, комбикорма, сахар и т.п. Более подробный их перечень возможно найти в специальной справочной литературе, как например, в работах [1 – 4].

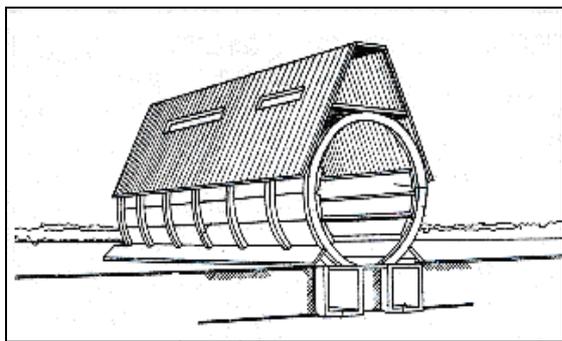
В процессе технологической переработки все сыпучие материалы в той или иной степени подвергаются достаточно несложной и распространенной операции – хранению. Оно может быть как длительным, так и кратковременным, однако в любом случае требует создания целого ряда специальных условий.

Неотъемлемым элементом операции хранения сыпучих веществ является наличие специальной строительной конструкции – емкости, в

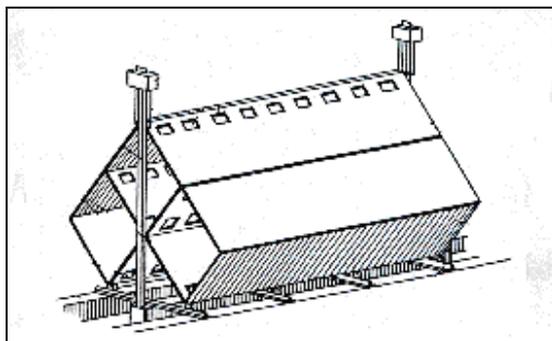
которую эти вещества периодически загружаются и по мере необходимости порциями извлекаются.

Такие конструкции появились и применяются уже достаточно давно и к настоящему времени они имеют целый ряд разновидностей, каждая из которых является более приспособленной для каких-либо конкретных условий хранения. Здесь возможно назвать горизонтальные хранилища в виде складов и закромов, вертикальные сооружения в виде силосных и бункерных емкостей, а также лотковые и гибкие емкости (чаще называемые лотковыми и гибкими бункерами, соответственно), занимающие промежуточное положение между горизонтальными и вертикальными конструкциями. Отдельную группу составляют подвижные емкости, как например, железнодорожные вагоны-думпкары или вагоны-хопперы, предназначенные для транспортировки сыпучих материалов. На рис. 1 представлены перечисленные основные разновидности емкостных конструкций.

Одной из основных проблем при создании и эксплуатации различных емкостных конструкций является адекватный учет свойств хранимых сыпучих материалов. Это связано с задачей определения давления сыпучего материала, оказываемого им на элементы конструкции, что обусловлено необходимостью создания надежных и долговечных емкостных конструкций.



а)



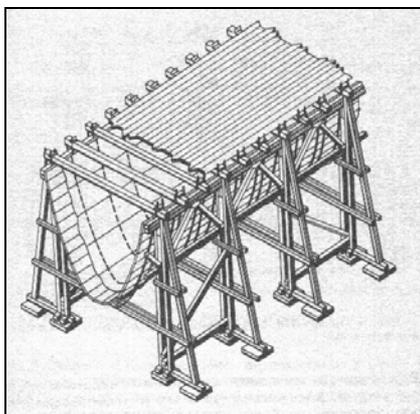
б)



в)



г)



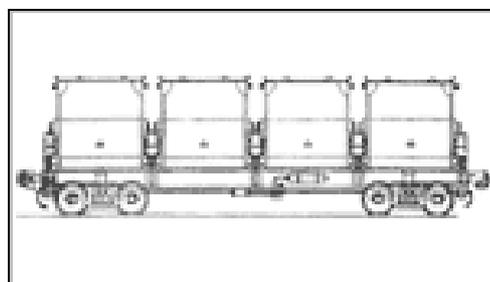
д)



е)



ж)



з)

Рис. 1. Современные разновидности емкостных конструкций:  
 а) горизонтальный склад со сквозной галереей; б) горизонтальный склад с камерной галереей;  
 в) бункерная емкость; г) силосная емкость; д) гибкий бункер; е) лотковый бункер;  
 ж) вагон-думпка; з) вагон-бункер

## 2. Представления об угле укладки зерен сыпучего материала

Сама задача определения давления сыпучего материала в замкнутом сосуде к настоящему времени имеет множество попыток теоретического решения. Их все возможно разделить на три крупных направления, и каждое из них имеет множество сторонников.

Первое связано с рассмотрением сыпучего материала как сплошной континуальной среды. Это дает возможность использовать для описания давления сыпучего материала понятие о напряжениях и деформациях и составлять дифференциальные уравнения равновесия. Наиболее известные работы в этой области принадлежат Дж. Робертсу, Г. А. Янсену, Н. В. Васильеву, Л. М. Емельянову, В. А. Олевскому, Е. М. Гутьяру, Я. Б. Львину, Р. Л. Зенкову, В. А. Битюкову, Н. П. Платонову, К. В. Алферову, Н. В. Сорокину, В. В. Соколовскому, А. М. Курочкину и пр.

Второе направление заключается в рассмотрении дискретной зернистой структуры сыпучего материала и применении к его исследованию статистических методов. Этот путь оказался чрезвычайно сложным, а полученные решения исключительно громоздкими и малопригодными с практической точки зрения. Поэтому сторонников у этого направления не так много – Г. И. Покровский, М. Н. Троицкий, М. С. Бернштейн, А. Г. Иммерман, И. И. Кандауров, И. Т. Сергеев и др.

Третье направление предполагает создание дискретно-континуальной модели сыпучего материала, т.е. учет как дискретных свойств сыпучего массива, проявляющихся интегрально, так и его зернистой структуры, позволяющей получить количественные оценки поведения среды. Данное направление является наиболее молодым и считается наиболее перспективным и поэтому, также, успело накопить не очень значительное количество исследований. Наиболее известные работы принадлежат Г. С. Зелинскому, Т. Б. Денисовой, Л. В. Гячеву и В. А. Богомягих.

Последние три автора вводят в своих исследованиях понятие об угле укладки зерен сыпучего материала. Под ним понимается угол  $\beta$ , образуемый вертикальной осью и осью, соединяющей центры двух соседних шаров (рис. 2). При этом необходимо рассматривать само понятие укладки зерен сыпучего материала и причислять его к другим ранее использовавшимся физико-механическим свойствам, таковым как его гранулометрический состав, угол естественного откоса, углы внешнего и внут-

реннего трения, плотность, пористость, сцепление и пр.

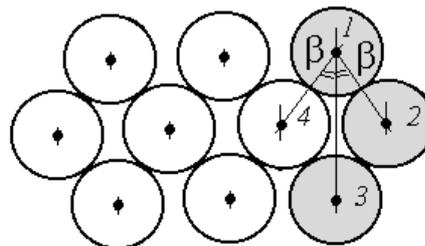


Рис. 2. Угол укладки зерен сыпучего материала

Все перечисленные авторы рассматривают сыпучий материал, состоящий из зерен одинакового размера. При этом каждый из них указывает несколько отличающиеся предельные положения зерен 1-4 сыпучего материала и приводит соответственно различные значения диапазона возможного изменения значения угла укладки.

Так, согласно В. А. Богомягих [5] угол укладки сыпучего материала не является постоянным, а зависит от угла истечения и его диапазон изменения поэтому может быть произвольным.

Т. Б. Денисова в работе [6] приводит два предельных плоских случая расположения зерен сыпучего материала (рис. 3). Соответствующий им диапазон изменения угла укладки составляет  $0...30^\circ$ .

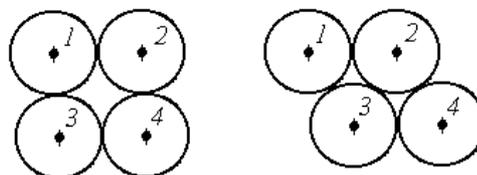


Рис. 3. Угол укладки зерен сыпучего материала по Т. Б. Денисовой

Согласно Л. В. Гячеву [6], для плоского случая предельная укладка зерен сыпучего материала имеет вид, изображенный на рис. 4. При этом диапазон изменения угла укладки составляет  $30...60^\circ$ .

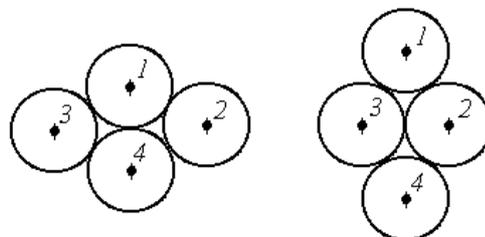


Рис. 4. Угол укладки зерен сыпучего материала по Л. В. Гячеву

Проанализировав указанные три подхода к определению угла укладки зерен сыпучего материала, автору настоящей публикации представляется справедливым констатировать следующее.

1. Угол укладки в статическом состоянии сыпучего материала представляется не совсем корректным связывать с углом истечения при движении сыпучего материала, как это делает В. А. Богомягких. Если такая связь и имеет место, то очевидно, что тогда следует различать два отдельных параметра – статический и динамический углы укладки. К тому же, вопрос о наличии вообще какого-либо стабильного угла укладки в движущейся массе сыпучего материала требует достаточно серьезного экспериментального подтверждения.

2. Справедливость какой-либо из форм укладки сыпучего материала должна быть проверена экспериментально, ввиду наличия различных предположений по этому поводу у Т. Б. Денисовой и Л. В. Гячева.

3. Реальная укладка зерен сыпучего материала является пространственной, поэтому необходимо отыскивать угол укладки именно для этого случая, но не для плоского случая.

4. Размеры зерен реального сыпучего материала неодинаковы, поэтому угол укладки должен учитывать это обстоятельство.

5. Форма зерен реального сыпучего материала не является шаровой, поэтому угол укладки должен учитывать это обстоятельство.

Справедливости ради заметим, что в работе [7] Л. В. Гячевым обращается внимание на последние два обстоятельства, однако, вывод к которому он приходит, заключается в расширении диапазона возможных значений угла укладки от 0 до 90°.

Рассмотрение указанных пяти соображений и является той целью, которую автор преследовал в ходе проведения своих собственных исследований, описанных далее в настоящей публикации.

### **3. Предварительные теоретические соображения об угле укладки зерен сыпучего материала**

Реальный сыпучий материал представляет собой достаточно сложное по фракционному составу и характеру внутренних взаимодействий между отдельными его зернами образование. Поэтому следует изначально четко определить, о каких типах сыпучих материалов пойдет далее речь, т.е. на какие их типы могут быть распространены все сделанные заключения.

Во-первых, рассматриваемый сыпучий материал является зернистым, т.е. имеет в своем составе явно выраженные отдельные элементы.

Во-вторых, между отдельными зернами отсутствуют силы сцепления, но есть только силы трения. К таким сыпучим материалам относятся ряд веществ в сухом состоянии – сухой песок, уголь, зерно и т.д.

В-третьих, отдельные зерна сыпучего материала могут иметь разную форму и размеры.

Именно по отношению к таким сыпучим веществам в принципе оказывается применимо само понятие укладки зерен и угла укладки, соответственно. При этом размер и форма зерна сыпучего материала как раз и будут их определять.

Поскольку сыпучий материал рассматривается не сам по себе, а помещенный в замкнутый сосуд, то возникает вопрос, также, о влиянии формы сосуда на характер его укладки. Фактически, данный вопрос может быть сведен к вопросу об учете влияния угла наклона стенки сосуда на характер укладки.

Еще одним немаловажным фактором оказывается характер загрузки сыпучего материала в емкость, а точнее его скорость.

Таким образом, автором настоящей публикации признается влияние следующих факторов на величину угла укладки зерен сыпучего материала: форма зерна, размер зерна, угол наклона стенки емкости, скорость загрузки сыпучего материала в емкость.

Влияние каких-либо иных факторов, кроме четырех перечисленных, автору представляется невозможным, что следует из самого физического определения понятия об угле укладки. При этом рассматривается статическое состояние сыпучего материала.

Заметим, далее, что во всех теоретических моделях, рассматриваемых В. А. Богомягких, Т. Б. Денисовой и Л. В. Гячевым, предполагается рядовая укладка зерен сыпучего материала в случае их шарообразной формы и одинакового размера. При этом форма и размер зерна учитываются углом укладки интегрально, приводя к тому, что угол укладки для реальных сыпучих материалов может изменяться в диапазоне от 0 до 90°. Как отмечалось выше, эта идея наиболее полно развивается в работе Л. В. Гячева.

Однако о влиянии остальных двух факторов ни в одной из рассмотренных работ авторами не упоминается.

Таким образом, возникает необходимость проследить влияние угла наклона стенки емкости и скорости загрузки емкости на характер укладки зерен сыпучего материала.

#### 4. Экспериментальные наблюдения за характером укладки зерен сыпучего материала

Для решения сформулированной таким образом задачи автором были проведены специальные экспериментальные наблюдения. Их суть заключалась в следующем.

Изготавливалась специальная модель, которая представляла собой плоское вертикальное сечение емкости в месте ее вертикальной плоскости симметрии. Она состояла (рис. 5) из двух вертикальных прозрачных плоских листов, жестко скрепленных между собой по краям. Между ними размещались боковые жесткие элементы толщиной, равной диаметру использовавшегося сыпучего материала. Эти элементы имели возможность перемещаться между вертикальными листами таким образом, чтобы было возможно изменять их угол наклона по отношению к горизонту (угол  $\alpha$ ).

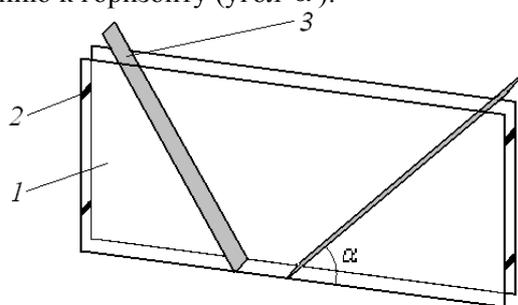


Рис. 5. Модель сечения емкости:  
1 – плоский вертикальный прозрачный лист;  
2 – крепление; 3 – боковой элемент

В качестве сыпучего материала принимался искусственный сыпучий материал со стандартным размером зерна, равным 8 мм.

В ходе наблюдений в экспериментальной модели варьировался угол наклона боковых элементов в диапазоне от 30 до 90° с шагом 10°. Углы наклона стенок обоих боковых элементов рассматривались как одинаковые, что соответствовало симметричной емкости. Размер выпускного отверстия принимался более 5 диаметров зерна сыпучего материала во избежание возможности сводообразования.

В ходе наблюдений загрузку сыпучим материалом осуществлялось двумя способами – по одному зерну, что соответствует низкой скорости загрузки, и насыпью всего объема сразу, что соответствует высокой скорости загрузки.

Всего таким образом было проанализировано около 30 различных комбинаций.

Полученные характерные картины укладки зерен сыпучего материала приведены на рис. 6.

Из анализа приведенных фотографий следует, что рядовая укладка зерен сыпучего материала приблизительно выполняется только при углах, близких к 60°. В остальных случаях укладка оказывалась далекой от рядовой.

При этом по мере загрузки происходило уплотнение структуры сыпучего материала. Так, верхний слой, соответствующий примерно 5...10 диаметрам зерна материала, оказывался достаточно рыхлым, все нижележащие слои имели более плотную укладку, которая существенным образом не изменялась с глубиной.

Кроме этого было установлено достаточно слабое влияние скорости загрузки на характер укладки зерен сыпучего материала.

Далее необходимо отметить, что было установлено формирование некоего пограничного слоя из зерен сыпучего материала толщиной примерно 5 диаметров зерна материала, в котором укладка была достаточно правильной. В центральной же части укладка приближалась к хаотической.

Из этого следует, что угол укладки зерен сыпучего материала вполне может рассматриваться как некая интегральная характеристика материала, не зависящая от свойств емкости, в которой находится материал.

Отдельный интерес представляет анализ самих процессов загрузки и выгрузки сыпучего материала. Было установлено, что при загрузке зерна сыпучего материала располагаются таким образом, чтобы центр их тяжести занял наиболее низкую позицию. Это достаточно точно согласуется с предположением, сделанным Л. В. Гячевым в работе [7].

При выгрузке происходит перераспределение структуры сыпучего материала таким образом, что процесс движения начинается послойно с более низких слоев. Это приводит к тому, что направление сил трения между зернами материала изменяется на противоположное по сравнению с состоянием статического покоя. Данное явление проиллюстрировано на рис. 7. По мнению автора настоящей публикации, оно может приводить к перераспределению давления, возможно, в сторону его скачкообразного повышения, и обязательно должно быть проанализировано теоретически. Возможно также, что именно это явление является причиной скачкообразного повышения давления сыпучего материала на стенки емкости в момент начала его разгрузки, описанное в ряде работ по данным источников [8] и [9], приводящие на практике к авариям емкостных конструкций именно в этот момент.

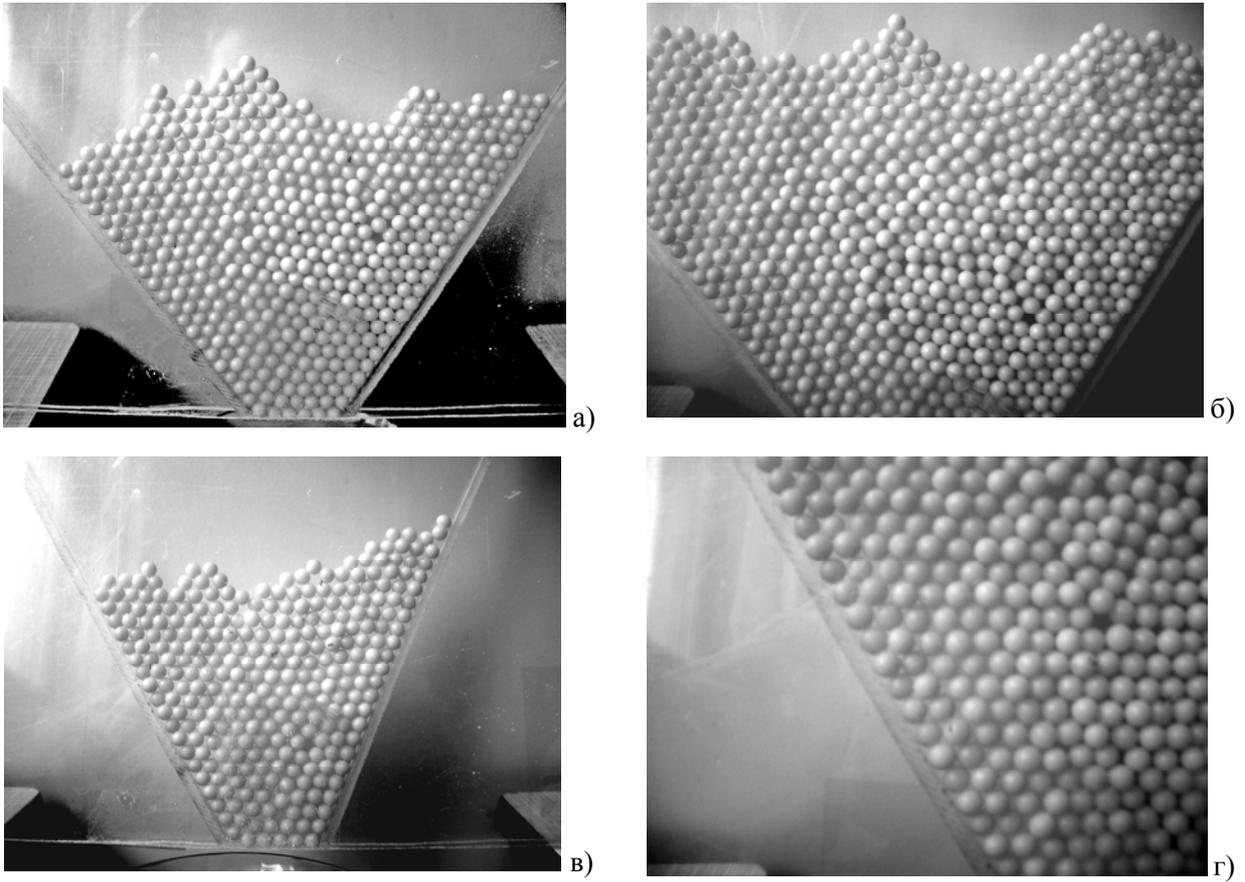


Рис. 6. Характер укладки зерен сыпучего материала при угле наклона боковых элементов:  
 а) 50°; б) 50° (увеличено); в) 65°; г) 65° (увеличено)

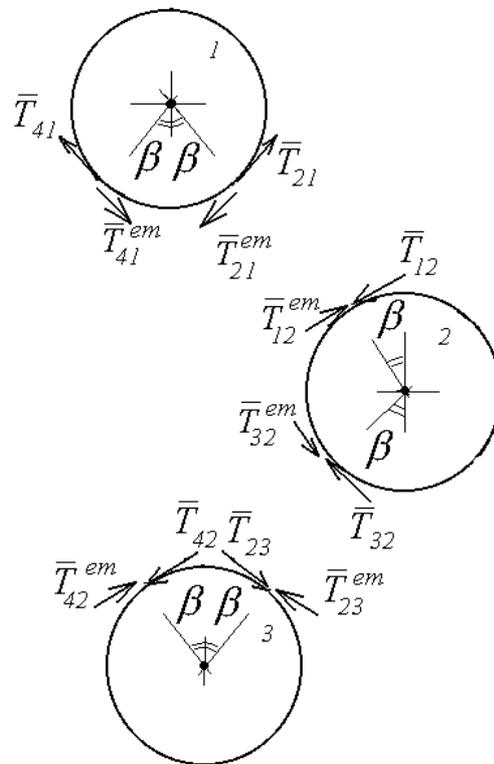


Рис. 7. Направление сил трения между зернами соседних слоев (по рис. 2):  
 $T_{ij}$  – сила трения в состоянии покоя;  $T_{ij}^{em}$  – сила трения в момент начала разгрузки

## 6. Основные выводы по работе

Таким образом, подытоживая результаты выполненных автором настоящей публикации экспериментальных наблюдений за характером укладки зерен сыпучего материала в модели емкостной конструкции, можно констатировать следующее:

1. Угол укладки зерен сыпучего материала может рассматриваться как интегральная характеристика самого сыпучего материала безотносительно к форме сосуда, в который он помещается, и скорости его наполнения.

2. Структура укладки зерен сыпучего материала образована двумя зонами: внешней, толщиной около 5 диаметров зерна материала, прилегающей к боковым стенкам с достаточно правильной укладкой и центральной, имеющей хаотическую беспорядочную укладку, определяемую углом укладки рассматриваемого материала.

3. В момент начала выгрузки сыпучего материала из емкостной конструкции был обнаружен эффект, заключающийся в изменении направления сил трения между отдельными зернами сыпучего на противоположное по сравнению со статическим состоянием. Указанный эффект может являться причиной скачкообразного изменения давления сыпучего материала, оказываемого им на стенки емкостной конструкции.

4. Ввиду отсутствия каких-либо физических параметров, дополнительно влияющих на угол укладки сыпучего материала при пространственной его укладке, полученные результаты могут быть индуктивно распространены на бо-

лее общий случай пространственной емкостной конструкции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величкина и В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
2. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
3. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
4. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: В 3 т. / Под ред. В. В. Кузнецова. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – М.: АСВ, 1998. – 526 с.
5. Богомягких В. А. Теория и расчет бункеров для сыпучих материалов. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1974. – 149 с.
6. Денисова Т. Б. Исследование выпускных устройств с целью совершенствования управления расходом зерна на предприятиях по его хранению и переработке: Автореф. дис. ... канд. наук. – М.: МТИПП, 1975. – 22 с.
7. Гячев Л. В. Основы теории бункеров. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 1992. – 312 с.
8. Семенов В. Ф. Бункеры и хранилища зерна: Учеб. пос. / Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. – 221 с.
9. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2008.